

PENGAMATAN OPTIK SATELIT LEO: ANALISIS FOTOMETRI [OPTICAL OBSERVATION OF LEO SATELLITES: PHOTOMETRY ANALYSIS]

Rhorom Priyatikanto¹, Abdul Rachman, Tiar Dani

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjuran 133 Bandung 40173 Indonesia

¹e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id

Diterima 3 Maret 2015; Direvisi 13 Maret 2015; Disetujui 16 April 2015

ABSTRACT

Observation of satellite & space debris encircling the Earth at low orbit can be conducted in optical window. Observation system that utilizes digital camera equipped with telescopic lens was developed by Space Science Center of LAPAN. More than hundred frames of wide field photograph were produced during observation campaign in August 2014. In this paper, there are 10 selected frames that consist of satellite trails for photometry analysis. Photometry analysis scheme consisting sky background modelling, trail identification, and flux extraction was implemented to the selected images in order to retrieve 10 light curves of 4 observed orbital objects, namely ISS, H-2A RB, Titan-4B RB, and TRMM. Flux variabilities are observed from those light curves, but the amplitude of variabilities are not significant to be considered as intrinsic variability of the objects with changing attitude, e.g. tumbling object. However, this study shows the success story of the photometry analysis scheme developed recently as a part of the future space surveillance system.

Keywords: *Orbital objects, Data analysis, Photometry*

ABSTRAK

Pengamatan benda antariksa pada orbit rendah dapat dilakukan pada jendela optik. Sistem pengamatan menggunakan kamera digital dengan lensa teleskopik telah dikembangkan oleh Pusat Sains Antariksa LAPAN. Lebih dari seratus bingkai citra medan lebar telah dihasilkan dalam pengamatan yang dilakukan pada Agustus 2014. Dalam makalah ini, dipilih sepuluh citra yang mengandung jejak satelit untuk analisis fotometri. Skema analisis fotometri yang terdiri atas pemodelan langit latar belakang, identifikasi jejak, serta ekstraksi fluks diterapkan pada citra hingga menghasilkan sepuluh kurva cahaya dari empat obyek antariksa yang diamati, yakni ISS, H-2A RB, Titan-4B RB, dan TRMM. Variabilitas *fluks* tampak dalam kurva cahaya tersebut, tetapi tidak cukup signifikan untuk dianggap sebagai perubahan kecerlangan obyek sebagai akibat dari perubahan sikapnya (misalnya *tumbling*). Meski demikian, studi ini menunjukkan keberhasilan skema analisis fotometri yang telah dikembangkan sebagai bagian dari sistem pemantauan benda antariksa.

Kata Kunci: *Benda orbital, Analisis data, Fotometri*

1 PENDAHULUAN

Kegiatan keantariksaan semakin intensif dewasa ini yang dibuktikan dengan peningkatan jumlah wahana antariksa secara eksponensial. Menurut katalog yang dirilis *North American Aerospace Defense Command* (NORAD) serta kompilasi dari *Union of Concern Scientist* (UCS), terdapat setidaknya 7591 satelit yang pernah diluncurkan hingga akhir 2014 (UCS, 2014). Di antara ribuan satelit tersebut, terdapat 13 satelit Indonesia yang mengitari Bumi pada orbit rendah (3 satelit) dan orbit geostasioner (10 satelit) yang menyokong aktivitas telekomunikasi Nusantara. Jumlah satelit tersebut tidak merepresentasikan jumlah obyek buatan pengorbit Bumi yang sering disebut

sebagai *orbital debris* atau *space debris*. Jumlah obyek buatan pengorbit Bumi yang tercatat dalam katalog *United State Space Surveillance Network* (dengan ukuran $D > 10$ cm) telah menembus angka 17.000 pada 2009, tetapi mengalami penurunan secara gradual (Orbital Debris Quarterly, 2014a). Di antara obyek tersebut, terdapat sekitar 4500 satelit (aktif dan tidak aktif), sekitar 3500 roket atau perangkat peluncur satelit, serta sekitar 9500 *fragmented debris*. Sebagian besar benda orbital berada pada orbit Bumi rendah (*Low Earth Orbit*, LEO) sekitar 600 hingga 1000 km di atas permukaan Bumi. Pada ketinggian ~ 790 km, kerapatan spasial benda-benda orbital amatlah tinggi, lebih dari 6×10^{-8} km⁻³ atau tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan tujuh tahun sebelumnya (Orbital Debris Quarterly, 2014b). Keberadaan benda pengorbit yang tidak terkendali memberikan ancaman terhadap misi antariksa yang operasional atau yang akan diluncurkan sehingga perlu selalu dipantau.

Sebagian besar benda orbital mengalami gangguan dan peluruhan orbit. Faktor alami mempengaruhi kala hidup benda orbital, di antaranya adalah tekanan radiasi, medan magnet Bumi, tumbukan meteoroid, paparan partikel bermuatan, tarikan gravitasi luni-solar, serta hambatan oleh atmosfer (de Lafontaine & Garg, 1980). Setiap faktor memiliki intensitas gangguan yang berbeda. Pada orbit rendah, gesekan atmosfer Bumi menjadi gaya yang paling dominan dalam memicu peluruhan orbit sebuah benda. Hilangnya energi orbit akibat gesekan atmosfer mengakibatkan penurunan eksentrisitas dan setengah sumbu panjang orbit sebuah benda sehingga lama-kelamaan benda tersebut akan mengalami *re-entry*, jatuh ke permukaan Bumi. Pemantauan terhadap benda orbital yang akan jatuh perlu dilakukan karena orbitnya tak terkendali dan senantiasa berubah. Perubahan kecil sekalipun mempengaruhi lokasi jatuhnya benda tersebut serta resiko yang mungkin timbul.

Beberapa tahun yang lalu, Pusat Sains Antariksa telah mengembangkan piranti lunak TRACK-IT yang berfungsi untuk memperkirakan benda orbital yang berpotensi jatuh di wilayah Indonesia (Rachman & Dani, 2010). Piranti ini bergantung pada katalog parameter orbit yang dipublikasikan dalam www.celestrak.com, sehingga kemandirian LAPAN dalam hal ini masih rendah. Kemudian, sistem pengamatan benda orbital dikembangkan pada 2013 – 2014 untuk mendukung sistem pemantauan benda jatuh antariksa. Pengamatan dilakukan pada jendela optik menggunakan kamera digital sebagai detektor serta teleskop sebagai kolektor (Dani *et al.*, 2014).

Mode pengamatan optik menjadi alternatif dan pelengkap pengamatan benda jatuh berbasis radar. Pengamatan optik mengandalkan pantulan cahaya Matahari dengan *fluks* berbanding terbalik dengan kuadrat ketinggian ($F \sim d^{-2}$), berbeda dengan *fluks* radar yang berbanding terbalik dengan ketinggian pangkat empat ($F \sim d^{-4}$). Oleh karena itu, pengamatan optik dapat mendeteksi obyek LEO berukuran kecil ($D \sim 1$ cm) atau obyek besar pada orbit geostasioner (Potter, 1995).

Karakterisasi benda orbital juga dapat dilakukan berdasarkan data pengamatan pada jendela optik. Sebagai contoh, Yanagisawa & Kurosaki (2012) membuat model elipsoid dari roket Cosmos 2082 berdasarkan kurva cahaya yang diperoleh pada jendela optik. Pemodelan juga menguak periode dan sumbu rotasi dari roket tersebut. Pemodelan kurva cahaya satelit pada orbit geostasioner juga dapat dilakukan (Seo *et al.*, 2013) hingga mengetahui bentuk obyek yang kompleks. Namun, sebelum mencapai tahapan analisis lanjut semacam itu, setiap hasil pengamatan perlu melalui proses identifikasi dan ekstraksi informasi. Melalui proses ini, keberadaan benda orbital dalam citra dapat dideteksi untuk analisis lebih lanjut.

Makalah ini bertujuan untuk melakukan analisis fotometri terhadap hasil pengamatan satelit orbit rendah yang dilakukan LAPAN pada 2014. Target dari analisis tersebut adalah untuk membangun kurva cahaya satelit yang merepresentasikan karakteristik dan kondisi satelit yang diamati. Hasil analisis fotometri juga digunakan

untuk menguji metode/*pipeline* analisis fotometri yang telah dikembangkan selama ini. Dengan demikian, studi ini diharapkan sebagai langkah awal pengembangan sistem terpadu (*hardware-software*) pemantauan satelit serta menjadi salah satu rintisan untuk mencapai kemandirian bangsa Indonesia dalam bidang keantariksaan.

2 DATA DAN METODE

Citra medan lebar diperoleh pada Agustus 2014 menggunakan kamera *Digital Single Lens Retract* (DSLR) Nikon tipe D70s yang memiliki sensor CMOS tiga warna (*Red Green Blue*, RGB) dengan 3008×2000 piksel, masing-masing berukuran 7,8 mikron. Sensitivitas kamera dapat diatur antara ISO 200 hingga ISO 1600. Kamera tersebut dilengkapi lensa teleskopik dengan panjang fokus 70 mm sehingga dapat mencakup medan pandang sebesar 20°×13°, kecuali untuk pengamatan 7 Agustus 2014. Pada tanggal tersebut, pengamatan dilakukan menggunakan lensa dengan medan pandang lebih luas, mencakup area 66°×44°.

Tabel 2-1: DAFTAR CITRA FIT PILIHAN YANG DIANALISIS DALAM STUDI INI

| No. | Nama File | Waktu Pengamatan | | exp. | ISO | Obyek |
|-----|------------------|------------------|-----------|------|------|-------------|
| 1. | 20140807-007.fit | 7-8-2014 | 04.55 WIB | 15 s | 1600 | ISS |
| 2. | 20140807-008.fit | 7-8-2014 | 04.56 WIB | 15 s | 1600 | ISS |
| 3. | 20140815-008.fit | 15-8-2014 | 05.10 WIB | 15 s | 800 | H-2A RB |
| 4. | 20140815-009.fit | 15-8-2014 | 05.13 WIB | 15 s | 800 | H-2A RB |
| 5. | 20140823-001.fit | 23-8-2014 | 05.09 WIB | 15 s | 1600 | Titan-4B RB |
| 6. | 20140823-002.fit | 23-8-2014 | 05.11 WIB | 15 s | 1600 | Titan-4B RB |
| 7. | 20140824-002.fit | 24-8-2014 | 04.47 WIB | 15 s | 1600 | TRMM |
| 8. | 20140824-003.fit | 24-8-2014 | 04.48 WIB | 15 s | 1600 | TRMM |
| 9. | 20140824-011.fit | 24-8-2014 | 05.11 WIB | 15 s | 1600 | Titan-4B RB |
| 10. | 20140824-012.fit | 24-8-2014 | 05.13 WIB | 15 s | 1600 | Titan-4B RB |

Pengamatan dilakukan di kota Bandung beberapa jam sebelum Matahari terbit. Kamera diarahkan ke arah barat sesuai dengan prediksi lokasi kemunculan satelit. Piranti lunak MAXIMDL digunakan untuk mengendalikan kamera, memotret langit dengan waktu paparan (*exposure time*) dan sensitivitas ISO yang dikehendaki. Keluaran berupa citra dengan ekstensi .jpeg dan .fit disimpan untuk analisis lebih lanjut.

Di antara lebih dari 100 citra fit yang dihasilkan selama Agustus, dipilih sepuluh citra dengan jejak satelit yang cukup jelas. Tabel 2-1 merangkum informasi terkait citra pilihan tersebut. Citra fit tersebut merupakan *array* berukuran 3008×2000×3 yang berisikan cacah cahaya (*pixel count*, bernilai 0 – 255) pada pita merah (*R*), hijau (*G*), dan biru (*B*). Dalam studi ini, dipilih citra pada pita hijau untuk dianalisis. Setiap citra fit juga memiliki *header* yang berisikan beberapa informasi terkait pengamatan seperti tanggal dan waktu pengamatan, instrumen, waktu bukaan, dan sensitivitas ISO.

Citra kalibrasi seperti citra gelap (*dark frame*), citra bias (*bias frame*), dan citra medan datar (*flat field*) tidak tersedia sehingga reduksi standar tidak dapat dilakukan. Padahal, citra medan lebar yang diperoleh menunjukkan adanya *vignetting* atau penggelapan di tepian citra akibat ukuran pupil keluaran yang terlalu kecil dibandingkan ukuran detektor di bidang fokus. Oleh karena itu, pemodelan citra latar belakang, seperti yang akan dibahas pada Bab 3, menjadi penting untuk dilakukan.

Jejak satelit pada citra telah diidentifikasi secara manual dengan metode yang dijelaskan dalam Rachman & Dani (2014). Identifikasi tersebut menunjukkan bahwa jejak satelit berkaitan dengan benda antariksa pada orbit rendah, seperti *International Space Station* (ISS), badan roket (H-2A dan Titan-4B), serta satelit non-aktif (TRMM).

Skema analisis yang diterapkan merupakan perbaikan dari skema analisis yang telah dijelaskan dalam Priyatikanto et al. (2014). Gambar 3-1 menggambarkan alur proses yang dapat dibagi menjadi proses reduksi standar, pemodelan citra latar belakang, identifikasi jejak, serta ekstraksi fluks sebagai fungsi waktu.

2.1 Reduksi Standar

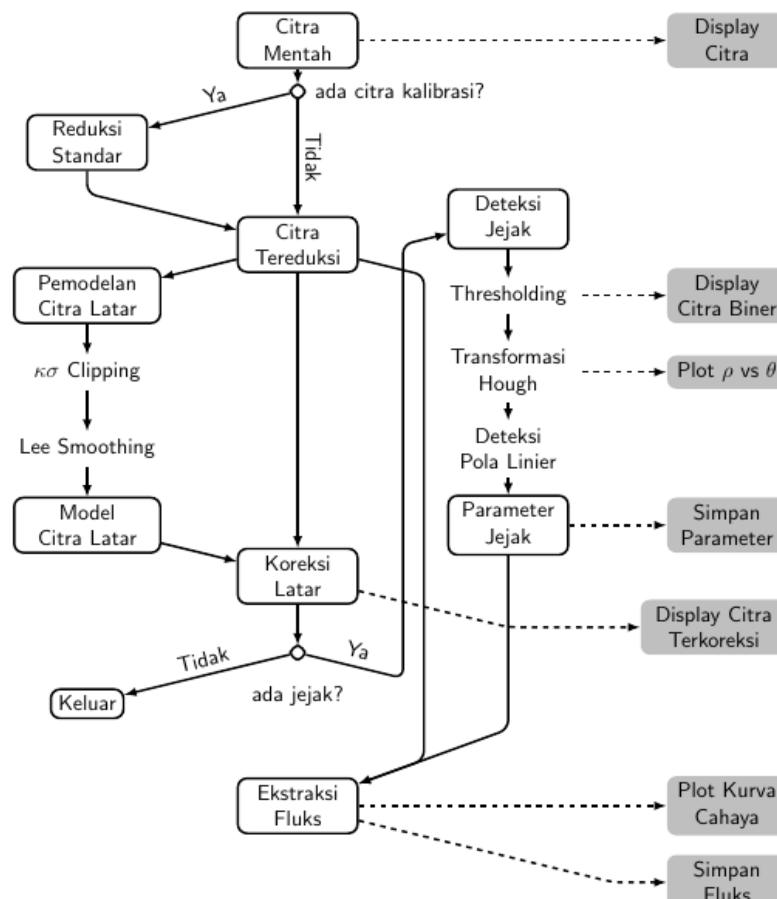
Citra yang diambil menggunakan kamera digital berbasis *Charge Coupled Device* (CCD) perlu melalui proses reduksi standar untuk meminimalisasi derau dan untuk kalibrasi pembacaan setiap piksel di dalamnya (Howell, 2006). Proses ini biasanya melibatkan tiga jenis citra kalibrasi, yakni citra bias, citra gelap, dan citra medan datar.

Citra bias diambil dengan waktu paparan nol detik dalam kondisi *shutter* tertutup. Citra ini digunakan untuk mengetahui titik nol pengukuran yang dapat berbeda satu piksel dengan yang lain. Selanjutnya, citra gelap merepresentasikan derau termal yang terakumulasi selama waktu paparan. Akumulasi derau termal bergantung pada waktu paparan sehingga citra gelap diambil dengan waktu paparan yang sama dengan waktu paparan citra obyek, tetapi diambil dalam kondisi *shutter* tertutup. Citra medan datar digunakan untuk kalibrasi sensitivitas tiap piksel yang belum tentu sama. Pemotretan sumber cahaya datar seperti langit senja atau sumber cahaya buatan (seperti *flat dome* dan *flat box*) dilakukan untuk mendapatkan citra medan datar.

Proses untuk mendapatkan citra tereduksi (R) dapat dituliskan sebagai

$$R = \frac{(O - B) - (D - B)}{(F - B)} \tag{2-1}$$

dimana O , B , D , dan F berturut-turut menyatakan citra obyek (mentah), citra bias, citra gelap (*dark frame*), dan citra medan datar (*flat field*).



Gambar 2-1: Skema analisis fotometri yang dilakukan dalam studi ini

2.2 Pemodelan Citra Latar Belakang

Satu karakteristik citra medan lebar yang ditelaah dalam studi ini adalah memiliki latar belakang yang tidak seragam. Setidaknya, terdapat tiga faktor yang menyebabkan ketidakseragaman tersebut: (1) *vignetting* akibat penggunaan lensa medan lebar, (2) ketidakseragaman akibat cahaya senja/fajar, (3) polusi cahaya dari kota Bandung. Karakter semacam ini menyebabkan identifikasi jejak menjadi lebih sulit. Oleh karena itu, pemodelan langit latar belakang perlu dilakukan untuk mengoreksi cacat dari citra sebelum melalui proses identifikasi citra.

Dalam sebuah citra, nilai pada tiap pixel (*pixel count*) merupakan hasil penjumlahan dari *fluks* obyek ($x_{i,j}$) dan langit latar belakang ($b_{i,j}$):

$$R_{i,j} = x_{i,j} + b_{i,j} + \varepsilon_{i,j} \quad (2-2)$$

dimana *fluks* langit latar belakang diasumsikan memiliki distribusi spasial yang mulus. Model langit latar belakang dapat diperoleh berdasarkan perhitungan statistik tertentu. Sebagai contoh, program DAOPHOT (Stetson, 1987) dan SExtractor (Bertin & Arnouts, 1996) menggunakan modus dari distribusi nilai piksel sebagai acuan nilai langit latar belakang.

Pada studi kali ini, metode *filtering* Lee (Lee, 1981) diadopsi untuk memodelkan langit latar belakang yang tidak seragam. Metode ini sebenarnya dikembangkan untuk menyaring derau yang bersifat *multiplicative* hingga menghasilkan citra yang lebih mulus. Lee (1981) memodelkan citra dengan *multiplicative noise* sebagai:

$$b'_{i,j} = b_{i,j} \cdot \varepsilon_{i,j} \quad (2-3)$$

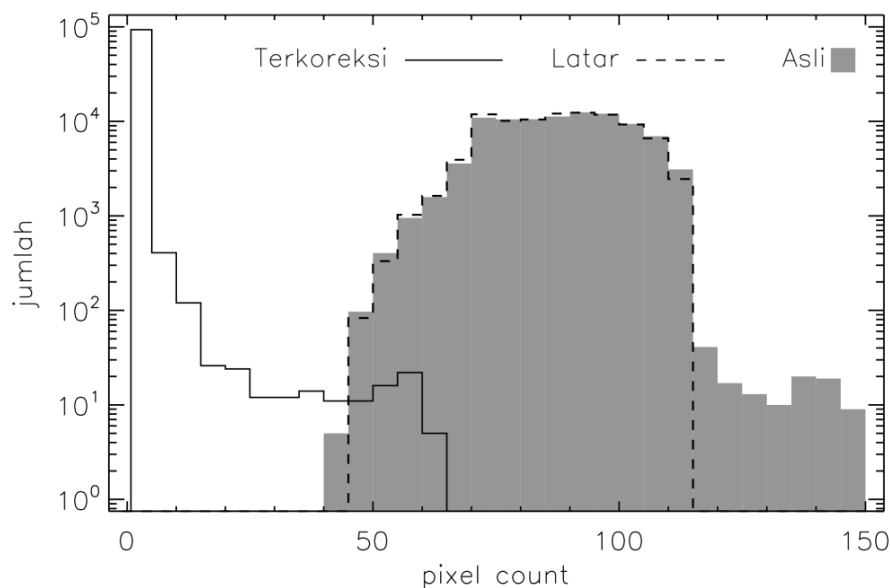
dimana b' , b , dan ε berturut-turut menyatakan citra yang teramati, citra asli, serta derau. Metode Lee mencari perkiraan rata-rata kuadrat dari b untuk tiap piksel, yakni dengan persamaan:

$$\hat{b}_{i,j} = \bar{b}_{i,j} + k_{i,j}(b'_{i,j} - \bar{b}_{i,j}) \quad (2-4)$$

dimana koefisien $k_{i,j}$ dihitung dengan persamaan:

$$k_{i,j} = \frac{\text{Var}(b)}{b^2 \sigma_\varepsilon^2 + \text{Var}(b)} \quad (2-5)$$

dengan nilai \bar{b} dan $\text{Var}(b)$ diperkirakan berdasarkan \bar{b}' dan $\text{Var}(b')$ dari sub-citra berukuran tertentu.

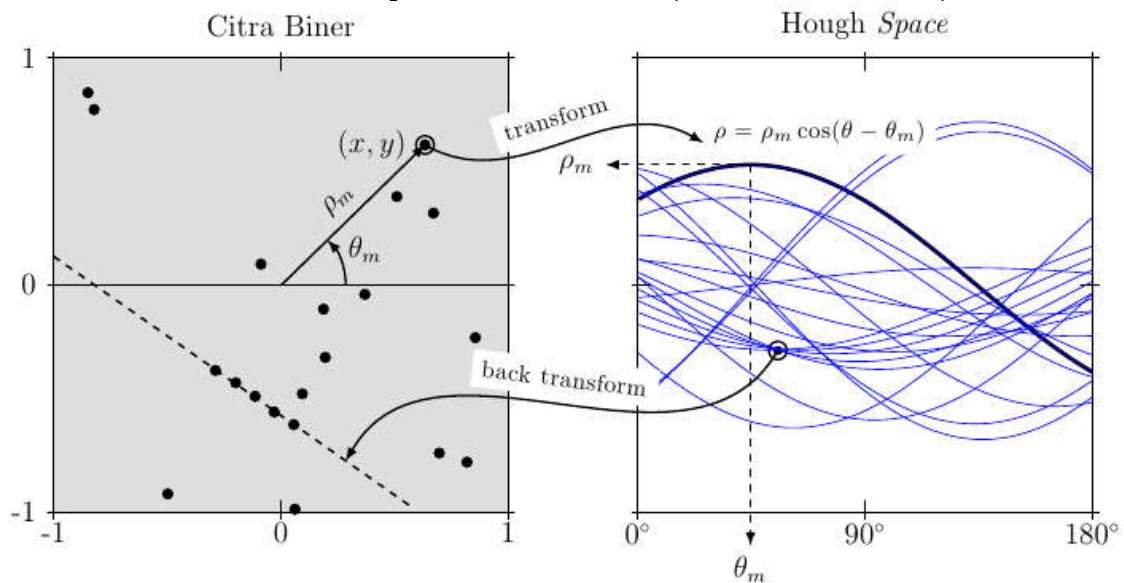


Gambar 2-2: Distribusi *pixel count* dari citra 20140807-008.fit (area abu-abu) bersesuaian dengan langit latar belakang yang tidak homogen. Reduksi dengan model langit latar belakang (garis putus-putus) menghasilkan citra terkoreksi yang memiliki histogram ideal (garis tegas), yakni memiliki latar belakang dengan distribusi *Poisson*

Proses *filtering* dilakukan terhadap citra tereduksi ($R_{i,j}$) hingga menghasilkan citra yang lebih mulus ($b_{i,j}$). Kemudian, citra tersebut dikoreksi menggunakan model citra latar belakang. Hasilnya adalah citra dengan latar belakang yang homogen dan siap melalui proses identifikasi jejak. Citra yang telah terkoreksi memiliki distribusi nilai piksel yang berbeda dibandingkan citra sebelumnya. Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3-2, citra terkoreksi memiliki distribusi nilai piksel yang menyerupai distribusi *Poisson* (misalnya Patat, 2003). Sinyal dari obyek tidak lagi tenggelam dalam langit latar belakang yang tidak seragam.

2.3 Identifikasi Jejak

Obyek yang menjadi fokus dari studi ini adalah jejak satelit yang tertangkap dalam citra medan lebar. Transformasi Hough (Hough, 1962) merupakan salah satu algoritma yang banyak digunakan untuk mendeteksi pola linier dari sebuah citra (Laas-Bourez *et al.*, 2009). Algoritma ini juga telah dikembangkan hingga dapat mendeteksi pola non-linier (Storkey *et al.*, 2004), bahkan dapat juga digunakan untuk mendeteksi keberadaan sabit tipis Bulan atau hilal (Fakhar *et al.*, 2014).



Gambar 2-3: Skema transformasi Hough dari sebuah citra biner menjadi kurva sinusoidal pada ruang Hough (θ, ρ)

Pada dasarnya, transformasi Hough mengubah koordinat kartesian dari suatu pixel dalam citra menjadi suatu kurva sinusoidal dalam ruang Hough (plot ρ terhadap θ). Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3-3, posisi sebuah piksel relatif terhadap pusat citra (x,y) dapat dinyatakan dalam koordinat polar (θ_m, ρ_m), di mana ρ_m menyatakan jarak piksel dari pusat citra, sedangkan θ_m menyatakan sudut azimuth dari piksel tersebut, diukur dari sumbu x positif. Definisi tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\rho_m = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2-6}$$

dan

$$\theta_m = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \tag{2-7}$$

dimana $0^\circ \leq \theta_m \leq 180^\circ$ dan ρ_m dapat bernilai negatif.

Dalam ruang Hough, piksel tersebut berasosiasi dengan kurva sinusoidal:

$$\rho = \rho_m \cos(\theta - \theta_m) \tag{2-8}$$

Bila terdapat sejumlah piksel yang berada pada satu garis, maka dalam ruang Hough terdapat beberapa kurva sinusoidal yang berpotongan pada suatu titik tertentu. Semakin nyata pola linier dalam citra, maka jumlah kurva yang berpotongan pun semakin banyak. Bila pencacahan (*voting*) pada ruang Hough dilakukan (misalnya dengan menghitung jumlah kurva yang melewati titik (θ, ρ) tertentu), maka pasangan (θ_p, ρ_p) dengan cacah terbanyak berkaitan dengan pola linier paling nyata dalam citra.

Garis atau jejak satelit dalam citra berjarak ρ_p dari pusat citra serta dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$y = a + bx \quad (2-9)$$

dengan

$$a = \frac{\rho_p}{\sin \theta_p} \quad (2-10)$$

dan

$$b = \tan(90^\circ + \theta_p) \quad (2-11)$$

Kedua parameter jejak (a dan b) disimpan untuk proses lebih lanjut.

Transformasi Hough dapat diterapkan pada citra dengan gradasi nilai piksel. Namun, penerapan terhadap citra biner lebih mudah dilakukan. Selain itu, identifikasi jejak lebih mudah dilakukan karena kontras yang lebih tinggi pada ruang Hough.

Untuk memperoleh citra biner, proses *thresholding* dilakukan. Dalam proses ini, piksel dengan nilai lebih dari ambang batas tertentu dianggap bernilai 1 sedangkan piksel lainnya bernilai 0. Ambang batas (l) ditentukan berdasarkan statistik nilai piksel, yakni:

$$l = \bar{x} + \kappa \sigma_x \quad (2-12)$$

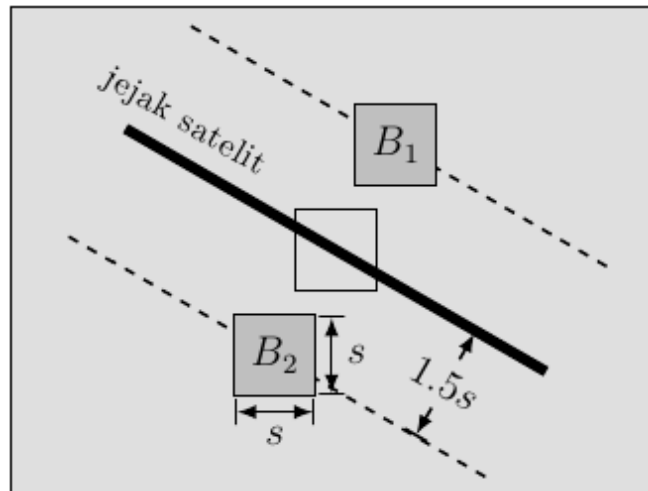
dimana \bar{x} dan σ_x menyatakan rata-rata dan simpangan baku dari distribusi nilai piksel citra yang telah dikurangi oleh model langit latar belakang, sedangkan $\kappa \approx 2,5$ merupakan faktor pengali.

2.4 Ekstraksi *Fluks*

Fluks yang diterima detektor pada dasarnya merupakan campuran dari *fluks* asli obyek (mengalami ekstingsi atmosfer), *fluks* langit latar belakang, serta derau. *Fluks* obyek dapat diekstraksi dengan berbagai cara, diantaranya dengan mencocokkan model *Point Spread Function* (PSF *photometry*) serta dengan metode fotometri bukaan (*aperture photometry*).

Fotometri PSF banyak digunakan untuk mengukur *fluks* bintang, terutama pada daerah dengan kerapatan bintang yang tinggi (Stetson, 1987; Bertin & Arnouts, 1996). Suatu fungsi Gaussian (atau fungsi sejenisnya) dicocokkan dengan nilai piksel yang menurun seiring bertambahnya jarak piksel dari pusat bintang. Dengan metode ini, *fluks* dari dua bintang yang tampak berdekatan dapat diekstraksi dengan baik.

Namun, fotometri PSF tidak dapat digunakan untuk analisis jejak satelit karena profil *fluks* dari obyek bergerak semacam itu tidak diketahui secara pasti. Karena itu, metode fotometri bukaan dipilih untuk ekstraksi *fluks* jejak satelit yang telah diidentifikasi. Tidak seperti pada fotometri bintang yang menggunakan bukaan berbentuk lingkaran, ekstraksi yang dilakukan dalam studi ini menggunakan bukaan berbentuk persegi dengan ukuran s yang ditentukan berdasarkan lebar obyek dalam citra (Gambar 3-4). *Fluks* obyek adalah total nilai piksel dalam persegi dikurangi rata-rata nilai piksel dalam area pembanding. Area pembanding berupa dua buah persegi yang berjarak $1,5s$ dari jejak satelit yang dianalisis.



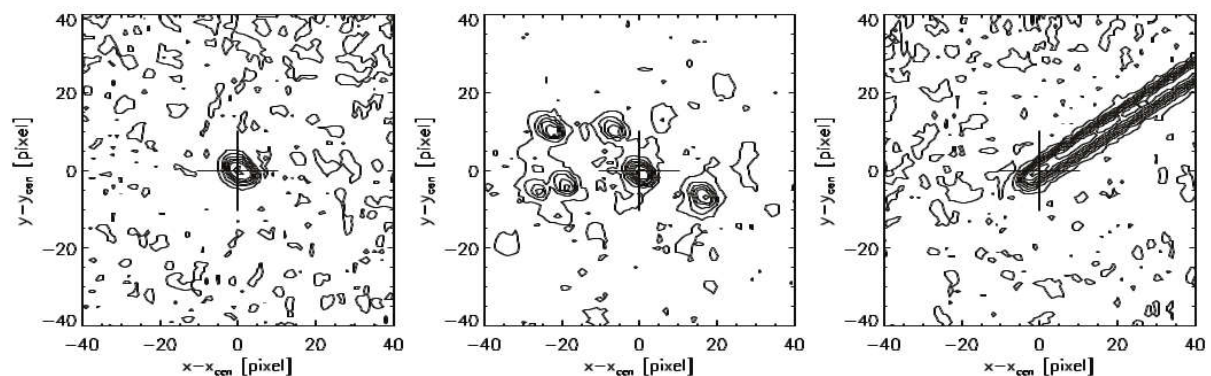
Gambar 2-4: Skema fotometri aperture untuk mengukur *fluks* pada area persegi yang berpusat pada jejak satelit. Fluks tersebut dikoreksi dengan area pembandingan atau area langit yang ditandai dengan persegi B_1 dan B_2

Ekstraksi *fluks* dilakukan sepanjang jejak satelit yang telah diidentifikasi dalam proses sebelumnya. Hasilnya adalah *fluks* satelit sebagai fungsi posisi yang dinyatakan dalam piksel. Hasil tersebut dapat ditransformasi menjadi kurva cahaya (*fluks* sebagai fungsi waktu) dengan mengacu pada waktu paparan (*exposure time*) yang digunakan untuk mendapatkan citra.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Fotometri Dasar

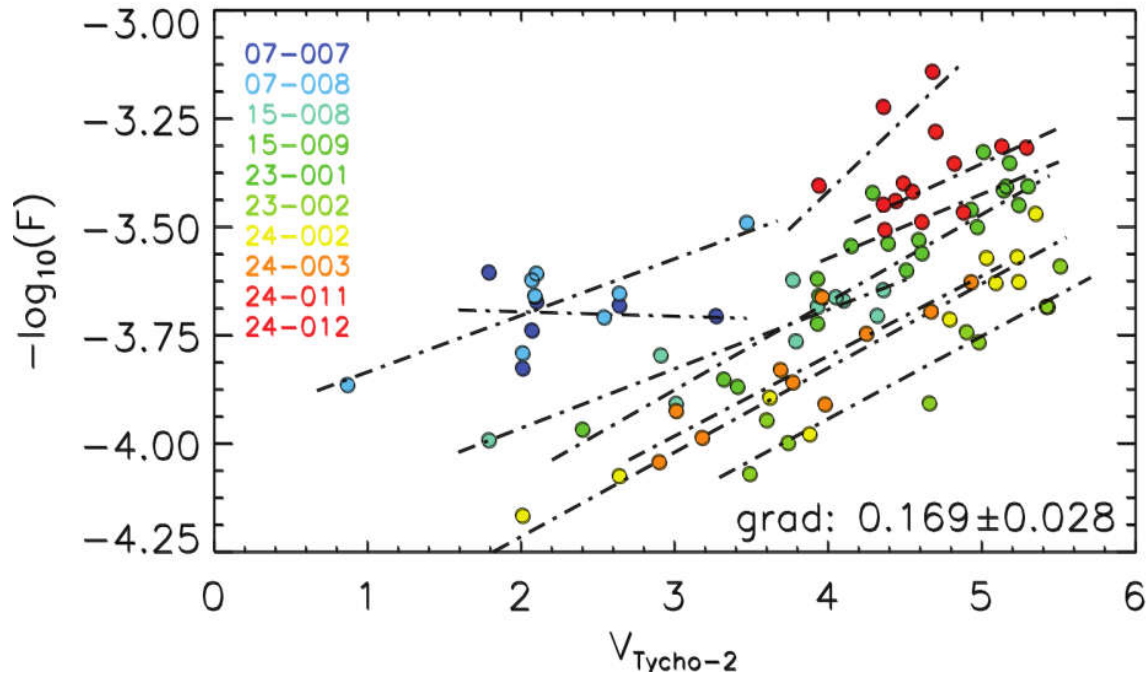
Citra yang dianalisis merupakan citra fit 8-bit. Tiap piksel didalamnya memiliki nilai 0 – 255. Menggunakan konfigurasi instrumen yang diulas pada Bagian 2, diperoleh citra dengan skala bayangan sebesar $1,32''/\text{piksel}$ untuk citra 20140807-007 dan 20140807-008. fit serta $0,39''/\text{piksel}$ untuk citra lainnya. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3-1, bintang dalam citra memiliki profil yang agak lonjong pada arah asensiorekta karena pemotretan dilakukan tanpa *sidereal tracking*. Ukuran obyek, khususnya *Full Width at Half Maximum* (FWHM), adalah sekitar 8 piksel pada arah asensiorekta serta sekitar 6 piksel pada arah deklinasi. Ukuran ini dijadikan acuan dalam penentuan ukuran persegi dalam fotometri bukaan.



Gambar 3-1: Kontur nilai piksel dari bintang Aldebaran (kiri), Pleiades atau M45 (tengah) dan jejak ISS (kanan) yang diperoleh dari citra 20140807-008.fit. Skala bayangan dari citra tersebut adalah $1,32''/\text{piksel}$

Untuk mengetahui perilaku detektor, fotometri bukaan dilakukan terhadap sekitar sepuluh bintang paling terang yang ada dalam citra. *Fluks* yang diperoleh berdasarkan analisis tersebut dibandingkan dengan magnitudo bintang pada pita V yang tercatat dalam katalog Tycho-2 (Hog *et al.*, 2000).

Gambar 3-2 menunjukkan plot logaritma dari *fluks* bintang terhadap magnitudo V dalam katalog Tycho-2. Regresi linier antara $-\log_{10}(F)$ dan V yang diperoleh dari setiap citra menghasilkan garis dengan gradien yang hampir sama, kecuali pada dua citra. Dari citra 20140807-007.fit, diperoleh garis regresi dengan kemiringan $-0,010$, sementara dari citra 20140824-012, didapatkan garis regresi dengan kemiringan $0,341$. Gradien garis regresi dari kedua citra menyimpang dibandingkan garis regresi yang lain. Kondisi langit yang dipenuhi polusi cahaya tampak nyata pada kedua citra sehingga faktor inilah yang diperkirakan menjadi penyebab penyimpangan.



Gambar 3-2: Perbandingan antara logaritma dari *fluks* bintang yang dianalisis dalam studi ini dengan magnitudo pita V dalam katalog Tycho-2 (Hog *et al.*, 2000).

Dengan mengabaikan regresi dari kedua citra, diperoleh bahwa garis regresi yang dihasilkan memiliki gradien $0,169 \pm 0,028$. Berdasarkan gradien tersebut, formulasi magnitudo sebagai fungsi *fluks* menjadi:

$$V = -5,92 \log F + C \quad (3-1)$$

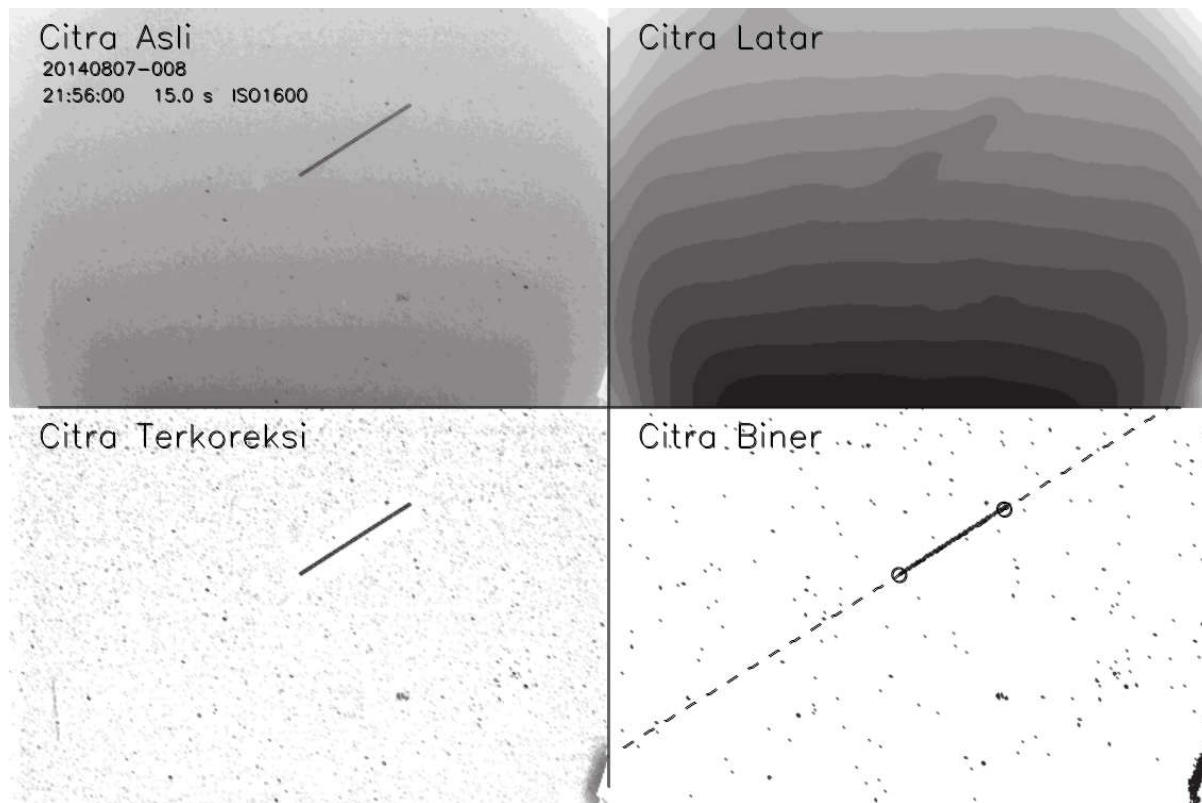
dengan C suatu konstanta yang bervariasi pada satu citra dan citra lain. Persamaan tersebut berbeda dengan persamaan magnitudo Pogson. Perbedaan ini diperkirakan muncul sebagai akibat dari kompresi file oleh kamera yang digunakan. Karakteristik instrumen semacam ini menyebabkan perhitungan magnitudo obyek tidak dapat dilakukan dengan akurat.

3.2 Analisis Jejak Satelit

Analisis fotometri terhadap salah satu citra medan luas dapat dilihat pada Gambar 3-3. Citra asli menunjukkan adanya variasi langit latar belakang serta penggelapan di bagian tepi citra akibat *vignetting*. Untuk pemodelan langit latar belakang serta identifikasi jejak satelit, citra asli diperkecil ukurannya melalui *binning* 4×4 . *Filtering* (dengan ukuran sub-citra 10×10 piksel) dilakukan terhadap citra berukuran 752×500 hingga menghasilkan model langit latar belakang. Citra asli yang dikurangi dengan langit latar belakang menghasilkan citra tereduksi dengan latar belakang yang lebih homogen. Selanjutnya, citra tersebut diubah menjadi citra biner melalui proses *thresholding* untuk deteksi jejak. Keluaran dari proses ini adalah

parameter jejak a dan b serta kecepatan sudut obyek yang tampak pada citra. Parameter-parameter tersebut dirangkum dalam Tabel 3-1.

Ekstraksi *fluks* dilakukan terhadap citra asli yang tidak dikoreksi dengan model langit latar belakang. Fotometri bukaan dilakukan sepanjang jejak satelit yang diperoleh dari transformasi Hough. Persegi berukuran 25×25 piksel digunakan sebagai area bukaan dan area pembanding. Ukuran tersebut kira-kira tiga kali FWHM bintang sebagaimana dibahas sebelumnya. *Fluks* obyek sebagai fungsi waktu atau kurva cahaya ditampilkan pada Gambar 3-4. Namun, magnitudo obyek belum dapat dihitung secara akurat karena karakter detektor yang belum dipahami dengan baik.



Gambar 3-3: Contoh pengolahan citra 20140807008.fit dari citra asli (*inverted*) hingga menghasilkan citra biner untuk identifikasi jejak satelit. Jejak yang teridentifikasi ditandai dengan garis putus-putus pada panel kiri bawah. Lingkaran menandai perkiraan pangkal dan ujung jejak satelit

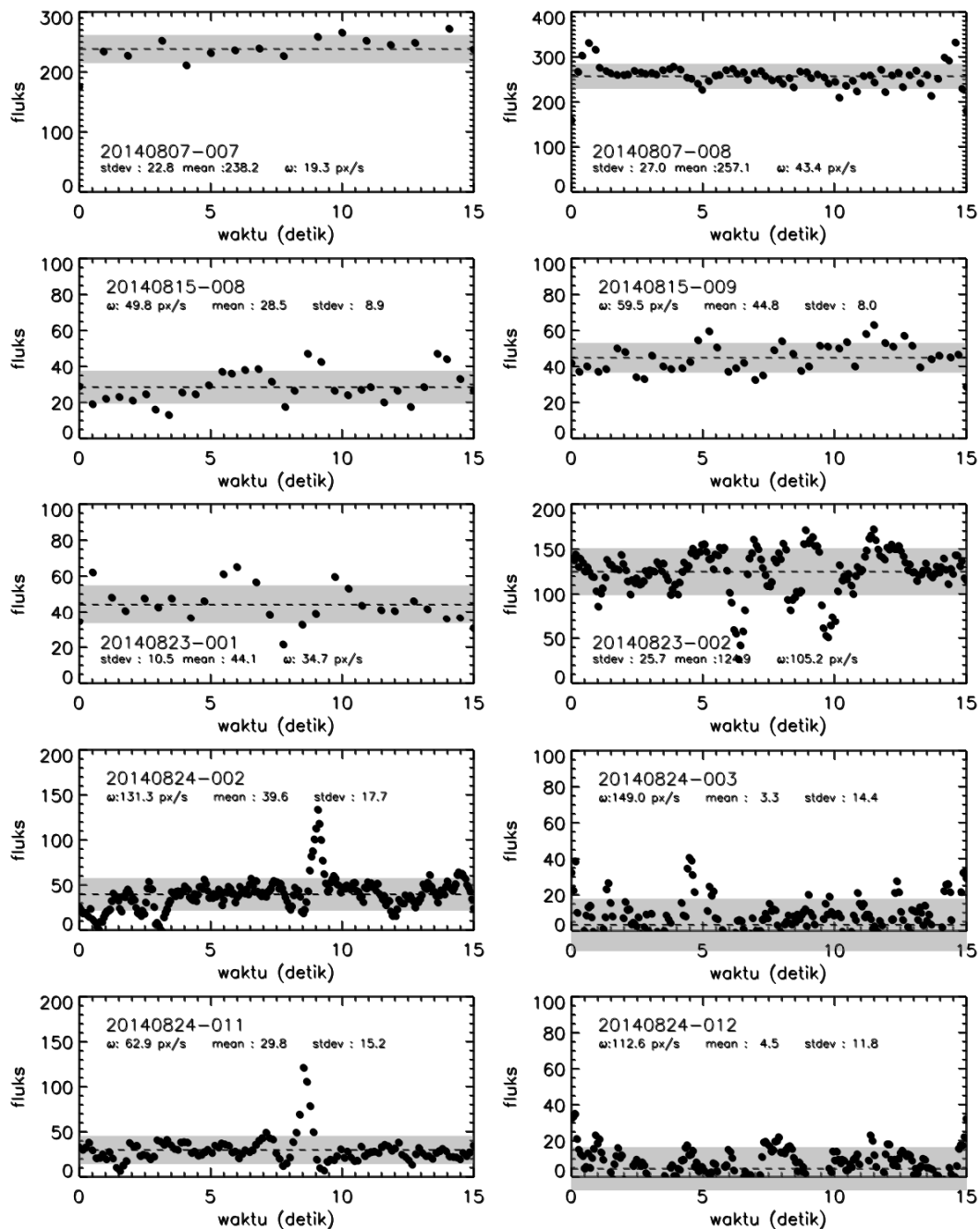
Kurva cahaya yang diperoleh menunjukkan adanya variasi *fluks* sebagai fungsi waktu, tetapi perubahan ini belum tentu berasal dari perubahan sikap dari obyek yang diamati (misalnya obyek mengalami *tumbling*). Simpangan baku dari *fluks* (σ_F) dapat merepresentasikan amplitudo perubahan *fluks* sebagai fungsi waktu.

Nilai F berkisar antara 8,0 hingga 27,0 *Analog to Digital Unit* (ADU atau juga disebut *counts*). Perubahan tersebut tidak jauh lebih besar dibandingkan derau citra dengan nilai sekitar 20 ADU. Selain itu, perubahan secara periodik pun tidak tampak jelas. Rendahnya rasio sinyal terhadap derau (*S/N ratio*) turut menyulitkan analisis fotometri yang dilakukan.

Kurva cahaya yang dihasilkan dari citra 20140824-002.fit dan 20140824-011.fit menunjukkan adanya peningkatan *fluks* secara tiba-tiba. Peningkatan tersebut timbul karena citra yang dihasilkan tidak bersih sepenuhnya. Terdapat debu pada lensa atau detektor yang menimbulkan noda pada citra yang tampak lebih gelap dari langit latar belakang. Akibatnya, *fluks* dari jejak satelit yang berada dekat dengan noda akan lebih tinggi dari seharusnya.

Tabel 3-1: RANGKUMAN HASIL ANALISIS FOTOMETRI YANG DILAKUKAN TERHADAP 10 SAMPEL CITRA DENGAN JEJAK SATELIT DI DALAMNYA

| No. | Nama File | Objek | a pixel | b | F ADU | σ_F ADU | ω '/s |
|-----|------------------|-------------|--------------|-------|------------|-------------------|-----------------|
| 1. | 20140807-007.fit | ISS | -164,0 | 2,19 | 238,2 | 22,8 | 24,7 |
| 2. | 20140807-008.fit | ISS | 99,1 | 0,62 | 257,1 | 27,0 | 59,5 |
| 3. | 20140815-008.fit | H-2A RB | 179,7 | -2,82 | 28,5 | 8,9 | 3,5 |
| 4. | 20140815-009.fit | H-2A RB | 219,5 | 2,41 | 44,5 | 8,0 | 3,2 |
| 5. | 20140823-001.fit | Titan-4B RB | -156,8 | -2,41 | 44,1 | 10,5 | 13,7 |
| 6. | 20140823-002.fit | Titan-4B RB | -130,8 | -0,52 | 124,9 | 25,7 | 41,2 |
| 7. | 20140824-002.fit | TRMM | -291,6 | 0,16 | 39,6 | 17,7 | 6,9 |
| 8. | 20140824-003.fit | TRMM | -243,8 | -0,87 | 3,3 | 14,4 | 5,6 |
| 9. | 20140824-011.fit | Titan-4B RB | -191,0 | -0,18 | 29,8 | 15,2 | 5,9 |
| 10. | 20140824-012.fit | Titan-4B RB | -436,3 | -0,04 | 4,5 | 11,8 | 4,7 |

Gambar 3-4: Kurva cahaya obyek orbital yang diekstrak dari citra medan lebar hasil pengamatan Agustus 2014. Nama file disertakan dalam setiap *plot*, diikuti oleh *fluks* rata-rata (*mean*), simpangan baku (*stdev*), serta perkiraan kecepatan sudut obyek (ω) dalam piksel/detik. Area abu-abu menandai daerah $\pm\sigma_F$ di sekitar nilai rata-rata *fluks*

Analisis fotometri yang dilakukan juga menghasilkan perkiraan kecepatan sudut obyek dilihat oleh pengamat di permukaan Bumi (ω) yang ditentukan berdasarkan panjang jejak satelit dalam citra, dikalikan skala bayangan citra tersebut. Kecepatan sudut yang diamati berkisar antara 3'/s hingga 1°/s. Dalam satu malam yang sama, sebuah obyek yang berada pada orbit rendah dapat terlihat dengan kecepatan sudut yang berbeda. ISS yang diamati pada 7 Agustus 2014 dan Titan-4B yang diamati pada 23 Agustus 2014 menjadi contoh dari kasus tersebut.

Berdasarkan *Two Line Elements* yang dirilis www.celestrak.com, ISS bergerak dengan gerak rerata (*mean motion*) sebesar 15,506/hari. Pada pukul 4:55 WIB, ISS tampak pada ketinggian $\sim 30^\circ$ dan bergerak dengan kecepatan $\sim 25'/s$, sedangkan pada pukul 4:56 WIB, ISS berada pada ketinggian $\sim 70^\circ$ dan bergerak dengan kecepatan sudut dua kali lipat lebih tinggi. Dengan analisis geometri sederhana, diperoleh bahwa jarak ISS dari pengamat pada pukul 4:56 WIB 3,3 kali lebih dekat dibandingkan jarak satu menit sebelumnya. Penjelasan yang sama berlaku untuk roket Titan-4B yang diamati pada 23 Agustus.

4 KESIMPULAN

Pada studi ini, analisis fotometri telah diimplementasikan pada sepuluh citra medan lebar yang mengandung jejak satelit atau benda antariksa pada orbit Bumi rendah. Skema tersebut terdiri atas pemodelan langit latar belakang, identifikasi jejak, serta ekstraksi *fluks*. Hasil yang diperoleh adalah: (1) parameter jejak yang menyatakan posisi dan kemiringan jejak, (2) perkiraan kecepatan sudut obyek, serta (3) kurva cahayanya.

Berdasarkan kurva cahaya yang didapatkan, belum dapat disimpulkan apakah obyek yang diamati mengalami perubahan kecerlangan atau tidak. Variabilitas *fluks* yang teramati tidak jauh berbeda dibandingkan derau citra. Selain itu, perubahan *fluks* tidak memiliki periode yang jelas. Meski demikian, studi ini menunjukkan keberhasilan dari *pipeline* analisis fotometri yang secara otomatis mampu mengidentifikasi jejak dan mengekstrak kurva cahaya darinya.

DAFTAR RUJUKAN

- Bertin, E. and S. Arnouts, 1996. *SExtractor: Software for Source Extraction*, Astronomy & Astrophysics, 117, 393.
- Dani, T.; Rachman, A.; Priyatikanto, R.; and B. Religia, 2014. *Development of Space Debris Optical Observation System in Indonesia: Preliminary Results*, Proceeding of the 5th International Conference on Mathematics & Natural Science.
- de Lafontaine, J. and S. C. Garg, 1980. *A Review of Satellite Lifetime and Orbit Decay Prediction*, UTIAS Review, 43.
- Fakhar, M.; Moalem, P.; and M. A. Badri, 2014. *Lunar Crescent Detection Based on Image Processing Algorithms*, Earth Moon & Planets, 114, 17.
- Hog, E.; Fabricius, C.; Makarov, V. V.; Urban, S.; Corbin, T.; Wyco, G.; Bastian, U.; Schwekendiek, P.; and A. Wicenec, 2000. *The Tycho-2 Catalogue of The 2.5 Million Brightest Stars*, Astronomy & Astrophysics, 355, L27.
- Hough, P. V. C., 1962. *Method and Means for Recognizing Complex Patterns*, US Patent 3069654.
- Howell, S. B., 2006. *Handbook of CCD Astronomy*, Cambridge University Press.
- Laas-Bourez, M.; Blacnhet, G.; Boer, M.; Ducrotte, E.; and A. Klotz, 2009. *A New Algorithm for Optical Observations of Space Debris with the TAROT Telescopes*, Advances in Space Research, 44, 1270.
- Lee, J. S., 1981. *Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images*, Computational Graphics & Image Processing, 17, 24.
- Orbital Debris Quarterly News, April 2014b.

- Orbital Debris Quarterly News, January 2014a.
- Patat, F, 2003. *A Robust Algorithm for Sky Background Computation in CCD Images*, Astronomy & Astrophysics, 401, 797.
- Potter, A. E., 1995. *Ground-Based Optical Observation of Orbital Debris: a Review*, Advances in Space Research, 16(11), 35.
- Priyatikanto, R.; Religia, B.; Rachman, A.; and Dani, T., 2014. *Towards Photometry Pipeline of the Indonesian Space Surveillance System*, Proceeding of the 5th International Conference on Mathematics & Natural Sciences.
- Rachman, A. and Dani, T., 2010. *Pengembangan Perangkat Lunak Pemantau Otomatis Benda Jatuh Antariksa*, Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa V.
- Seo, H.; Ho, J.; Song, Y.; Lee, Y.; and Y. Oh, 2013. *The Photometric Brightness Variation of Geostationary Orbit Satellite*, Journal of Astronomy & Space Science, 30(3), 179.
- Stetson, P. B., 1987. *DAOPHOT - a Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry*, Publication of the Astronomical Society of the Pacific, 99, 191.
- Storkey, A. J.; Hambly, N. C.; Williams, C. K. I.; and R. G. Mann, 2014. *Cleaning Sky Survey Data Bases using Hough Transform and Renewal String Approaches*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 347, 36.
- UCS, 2014: <http://satellitedebris.net/Database/LaunchHistoryView.php> diakses tanggal 5 Desember.
- Yanagisawa, T. and H. Kurosaki, 2012. *Shape & Motion Estimate of LEO Debris Using Light Curves*, Advances in Space Research, 50, 136.

